

令和 3 年 4 月 16 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03463

研究課題名（和文）粉粒体のサイズ分離現象：散逸粒子系の動的秩序形成の機構解明

研究課題名（英文）Segregation of granular media: Mechanism of spatio-temporal structure of dissipative multi-particle systems

研究代表者

稲垣 紫緒 (Inagaki, Shio)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：20452261

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：コーヒーにミルクを入れたり、墨汁を水にたらしたりすると、ほとんど勝手に混ざってしまいます。これは拡散現象と呼ばれ、私たちの生活のいたるところで見受けられます。一方で、つぶつぶした粒子からなる粉粒体は、種類の異なる粒子を振ったりゆすったりして混合するとき、混ぜようとするほど分離しやすい傾向があることが知られています。本研究では、粉粒体の混合・分離のメカニズムの基本原理を明らかにするために、円筒容器内に異なる種類の粒子を入れて、円筒容器を回転させたときに、粒子が縞模様を形成する分離現象について、粒子の比重やサイズを系統的に変えて実験を行い、分離が起こる条件を明らかにすることに成功しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工業的には、原材料の75%、製品の50%が粉粒体からなるといわれるように、工業プロセスのほとんどで粉粒体が関わっていますが、粉粒体製造に消費される電力は全体の1.3%に上ります。これまでは経験則に頼ることがほとんどでしたが、その効率的な扱いを根本的な原理から明らかにすることで、製造業におけるエネルギー消費を抑えることもできると期待されます。そのためにも、基礎科学的な側面から、粉粒体の分離・混合メカニズムの原理を明らかにし、具体的な物理量によって現象を記述する基礎方程式を確立することで、定量的に混合・分離の制御ができるようになる必要があります。

研究成果の概要（英文）：When you add milk to coffee or ink to water, it almost mixes by itself. This is called the diffusion phenomenon, and it can be seen everywhere in our daily lives. On the other hand, it is known that powders and granules made of macroscopic particles tend to separate more easily the more you try to mix them when you shake different types of particles. In this study, in order to clarify the basic principle of the mixing and segregation mechanism of granular materials, we conducted experiments on the segregation phenomenon in which particles of different types are placed in a cylindrical container and form a stripe pattern when the container is rotated, systematically changing the specific gravity and size of the particles. We experimentally found the conditions under which segregation occurs.

研究分野：非平衡散逸系物理学

キーワード：非平衡物理学 粉粒体物理学 非平衡散逸系 物性実験 相分離

1. 研究開始当初の背景

粉粒体とは巨視的な大きさを持った粒子の集団である。一般に粒子の直径が $100\mu\text{m}$ より大きい粒子からなり、熱揺らぎの影響は無視できる程度に十分大きい。その為、複数の種類の粒子を混ぜた時に、従来の熱揺らぎによる拡散では、均一な混合は不可能である。むしろ、混ぜようとすればするほど、相分離現象のように同じ種類の粒子同士が集まって分離しやすい性質がある。それは、粒子同士の衝突が非弾性的で、粒子表面での摩擦的相互作用など、系全体が散逸的であることに大きく起因する。

本研究申請では、回転する円筒容器内のサイズ分離現象に着目する。大きさや形が異なる2種類の粒子を同じ割合で円筒容器の50%の体積に充填し、水平に置いた円筒容器を回転させた時、軸方向に縞々模様(バンド)を形成することがよく知られている(図1) [I. Aranson *et al. Rev. Mod. Phys.* **78**, 641 (2006)]。時間の経過に伴って、バンドは軸方向に動きながら結合を繰り返し、単調な緩和現象となる [Frette *et al., Phys. Rev. E* **56** (1997) 6981]。円筒容器内の分離現象は、1980年代から現在まで充填率が50%程度の場合を中心に研究がなされてきた。しかし、なぜ粒子が分離し、バンドが自発的に運動するのか、を決める物理量は未だ解明されていない。粉粒体の場合、変えうるパラメータの数が膨大すぎて、分離現象の本質に関わるパラメータを系統的に振った実験的知見が未だ不十分であることが一因としてあげられる。

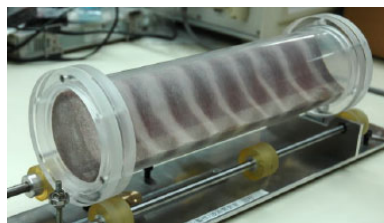


図1：実験設定(充填率50%)
粒子黒：赤砂($\phi\sim 0.4\text{mm}$)、
粒子白：珪砂($\phi\sim 0.2\text{mm}$)。
円筒は直径8cm、長さ30cm。

2. 研究の目的

本研究では、粉粒体の分離とそのダイナミクスを支配する物理量を明らかにし、粒子の種類や組み合わせによらない普遍的な分離現象の本質に迫ることを目的とする。

本研究では、回転する円筒容器内のサイズ分離現象について、主に実験的研究を行う。円筒容器を回転させることで、円筒容器の軸方向には均一な力学的駆動を与えているにもかかわらず、なぜ軸方向に分離してバンドが形成され、自発的に動くのか、未だ解明されていない。動的安息角(図3、雪崩面の水平からの角度)によってバンド形成を予測する式が経験的に知られているが [Hill *et al., Phys. Rev. E* **52** (1995) 4393]、実際にはその関係を満たさない例も多く、分離するかどうかを一般的に予測するのは困難である。動的安息角は「流動しやすさ」を表す一つの指標と考えられているが、その物理的な起源は明らかでない。動的安息角に代わる、より本質的な物理量を明らかにする必要がある。分離現象の本質に迫るには、力学的駆動と粒子間の散逸的な相互作用が分離のダイナミクスに及ぼす影響を定量的に明らかにする必要がある。

3. 研究の方法

(1) 粒子のサイズと比重を系統的に変化させ、回転する円筒容器内に等体積で2種類の粒子を封入して回転させたときの分離パターンを相図にまとめる。個々の粒子の動的安息角を測定し、分離状態との対応を調べる。

(2) 回転開始から5分後のバンドの本数を調べ、粒子サイズや比重とどのような関係にあるか調べる。粉体層表面で、どのように不安定化が誘起・駆動されるのか、その主な要因を具体的な物理量から検討する。

4. 研究成果

(1) 従来、回転ドラムの分離現象は、小さい粒子の動的安息角 (θ_S) が大きい粒子の動的安息角 (θ_L) より大きい時 ($\theta_S - \theta_L > 0$) に、軸方向の分離が起こって、縞模様を形成すると考えられてきていた。粒子のサイズと比重を系統的に変えて、様々な粒子の組み合わせで実験を行ったところ、この条件は比重比 $\rho^* = \rho_L/\rho_S = 1$ の時以外ほとんど成り立っていないことが分かった (図 2)。先行研究では、ほとんどの研究が比重比 1 で実験で行われていたが、実際には、 $\rho^* < 1$ で

(2) 以下のように、3 つの無次元パラメータを定義する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{比重比: } \rho^* = \frac{\rho_L}{\rho_S} \\ \text{粒径差: } \delta d^* = \frac{d_L - d_S}{d_{av}} \\ \text{円筒容器の内径: } D^* = \frac{D}{d_{av}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{大粒子密度: } \rho_L \\ \text{小粒子密度: } \rho_S \\ \text{大粒子粒径: } d_L \\ \text{小粒子粒径: } d_S \\ \text{平均粒径: } d_{av} = (d_L + d_S)/2 \\ \text{円筒容器内径: } D \end{array}$$

この 3 つの無次元パラメータの組み合わせが、バンド幅を小粒子の粒径で規格化した波長 (λ^*) と正の相関を持つことが分かった (図 3)。このことから、軸方向の分離を駆動する要因として、これら 3 つの無次元パラメータが重要な役割をはたしていることが示唆された。

さらに、これらの無次元パラメータの組み合わせを用いて実効的な比重比とサイズ差を定義する (図 4 キャプション)。相図を描くと、粒子の比重やサイズ、円筒容器の内径によらず、軸方向の分離が起こる条件を決めることができることが分かった。

実効的な比重比とサイズ差は、 ρ^* 、 δd^* 、 D^* の 3 次元プロットの相図から、ベクトルサポートマシンを用いたクラスタリングで、最もうまく分離できる値をフィッティングして求めた。今後は、なぜこのような形で分離状態がうまく分類できたのか、メカニズムを考慮したモデルを構築して、分離現象の本質に迫りたい。

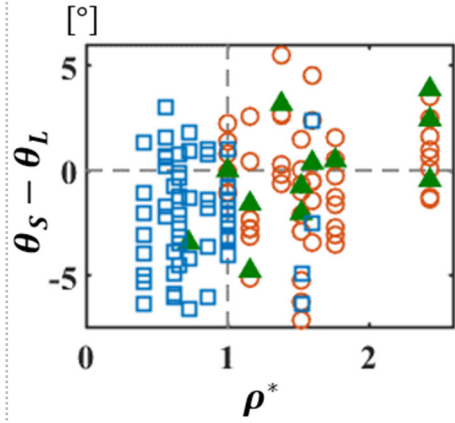


図 2: 粒子の比重比 ($\rho^* = \rho_L/\rho_S$) 対動的安息角の差 ($\theta_S - \theta_L$)
(□: 動径方向の分離、▲: 混合、○: 軸方向の分離)

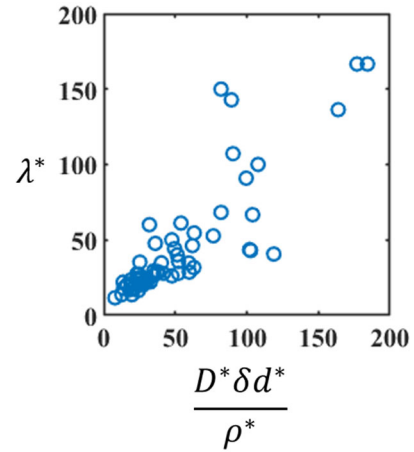


図 3: 小粒子の粒径で規格化バンド幅対無次元パラメータ ($\frac{D^* \delta d^*}{\rho^*}$)

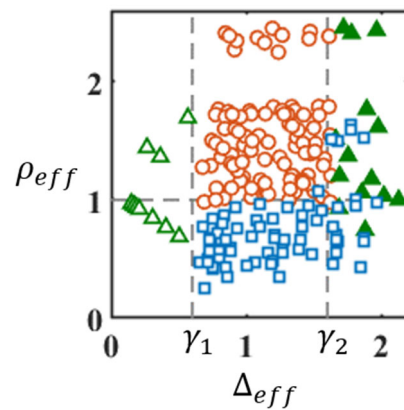


図 4: 分離状態の相図

$$\rho_{eff} = \rho^* - \frac{\alpha}{D^*} + \beta \delta d^*$$

$$\Delta_{eff} = \delta d^* + \frac{\alpha}{D^*} + \beta \rho^*$$

α と β はフィッティングパラメータ。(マークは図 2 と同じ)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 吉崎 隆一、平井 康丸、井上 真大朗、稲垣 紫緒、井上 英二、岡安 崇史、光岡 宗司	4. 巻 81
2. 論文標題 四角柱容器に堆積した初層の底面圧力と空隙率	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 383-391
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryuichi Yoshizaki, Yasumaru Hirai, Muneshi Mitsuoka, Shio Inagaki, Eiji Inoue, Takashi Okayasu	4. 巻 2018
2. 論文標題 Relationships between Mass and Porosity of Rough Rice Piled in a Combine Grain Tank	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB)	6. 最初と最後の頁 618-623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 近堂くるみ、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転ドラムにおける動径方向から軸方向への分離ダイナミクスの転移現象
3. 学会等名 西日本非線形研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内海脩帆、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転に誘起される粉粒体の ゆっくりとした対流現象について
3. 学会等名 西日本非線形研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近堂くるみ、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転ドラムでの動径方向分離における界面不安定性
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内海脩帆、稲垣紫緒
2. 発表標題 定常的な力学的駆動に誘起される粉粒体のゆっくりとした対流現象について
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 益永真聡、稲垣紫緒
2. 発表標題 二分散粉体ガスのクラスタリング現象
3. 学会等名 第125 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河本彩帆、稲垣紫緒
2. 発表標題 流動状態における 粉粒体の粘性
3. 学会等名 第125 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒河俊介、内海脩帆、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転円筒容器内における粉粒体のゆっくりとした対流現象について
3. 学会等名 第125 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近堂くるみ、稲垣紫緒
2. 発表標題 粉粒体のサイズと比重に依存した分離ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近堂くるみ、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転ドラムにおける動径方向の分離現象について
3. 学会等名 第124 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内海脩帆、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転円筒容器内の粉粒体の流れ場測定
3. 学会等名 第124 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近堂くるみ、稲垣紫緒
2. 発表標題 Size and density dependency on radial segregation in a rotating cylinder
3. 学会等名 Soft Matter Physics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲垣紫緒
2. 発表標題 Non-monotonic segregation dynamics in a half-filled rotating cylinder
3. 学会等名 Soft Matter Physics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近堂くるみ、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転ドラムにおける動径方向から軸方向への分離ダイナミクスの転移現象
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内海脩帆、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転円筒容器内の粉粒体の巨視的対流の流速測定
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣紫緒
2. 発表標題 Size and density dependency on segregation dynamics of granular media
3. 学会等名 第2回 九州大学女性研究者ダイバーシティシンポジウム(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣紫緒
2. 発表標題 粉粒体のサイズ分離現象
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口雅也、稲垣紫緒
2. 発表標題 二次元粉体流における障害物の影響
3. 学会等名 第126 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山科スミレ、稲垣紫緒
2. 発表標題 粉粒体の安息角に対する障害物の影響
3. 学会等名 第126 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米田翔一、内海脩帆、稲垣紫緒
2. 発表標題 回転円筒容器における単分散粉体系の対流現象
3. 学会等名 第126 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻村翔輝、稲垣紫緒
2. 発表標題 円筒容器内の粉体分離現象における回転速度依存
3. 学会等名 第126 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関